

# 高温炭搬送・装入技術に関する開発

栗山 壽志\*・吉田 周平\*・武富 洋文\*<sup>2</sup>・須山 真一\*<sup>3</sup>

Development of Hot Coal Transport and Charging into Coke Ovens

Hisashi KURIYAMA, Shuhei YOSHIDA, Hirofumi TAKETOMI and Shinichi SUYAMA

**Synopsis :** One of the targets of the SCOPE21 process was to enhance the environment around coke ovens. In this process, the charging coal was preheated to about 380°C and charged into the coke oven. Because the fine coal tends to disperse at high temperature, it was necessary to convey and charge into coke ovens with closed system. So that, the plug transport system was tested in order to clarify the properties of the transportation and to find the design parameter by the fundamental transport test and the combined element bench scale test. The transport system of pilot plant was designed based on the results, and the test was carried out. It was confirmed that the properties of the transportation and the design parameter are appropriate. Moreover, the charging property of the preheated coal into a hot coke oven chamber was made clear, and it was confirmed that the plug transport system provides smokeless and safe charging of preheated coal.

**Key words :** SCOPE21; preheated coal; plug transport; dust emission.

## 1. 緒言

次世代コークス製造技術<sup>1,2)</sup> (Super Coke Oven for Productivity and Environmental enhancement toward the 21st Century, 以下SCOPE21と略記)における開発目標の一つに環境改善が挙げられる。SCOPE21では、石炭を高温の状態ではコークス炉に装入することを計画している。石炭を高温予熱すると微粉石炭は飛散しやすくなり搬送過程や装入時に発塵することが考えられる。このため微粉石炭は成形し粗粒石炭と混合して搬送・装入することを計画しているが、未成形微粉の発生や搬送過程での成形炭の粉化を考慮すると、高温石炭を無発塵状態で輸送・装入する手段の開発が必要である。そこで、密閉輸送が可能で、高濃度・低流速で大量輸送可能なプラグ輸送方式について冷間試験装置を使用して輸送特性を検討した。次に要素組合せ試験(ベンチプラント試験, 以下BP試験と略記)設備で実機を想定したプラグ輸送試験設備を設置し、加熱直後の高温炭の熱間輸送試験を実施した。これらの結果を基にパイロットプラント(以下, PPと略記)試験輸送装置を設計し、輸送特性ならびに装入特性の評価を行い、次世代コークス炉にプラグ輸送方式での搬送・装入が可能であることを明らかにしたので以下に報告する。

## 2. プラグ輸送の輸送特性試験

### 2.1 試験装置

#### 2.1.1 冷間輸送試験装置

冷間輸送試験に用いた試験装置の概要をFig. 1に、仕様をTable 1に示す。実機を想定し輸送配管の直径は200 mmφとし、輸送配管途中に傾斜角45°の傾斜管を設置した。輸送媒体は窒素を使用し初期加圧は最大800 kPaまで可能なようにした。データ採取は0.5秒ピッチで実施し、

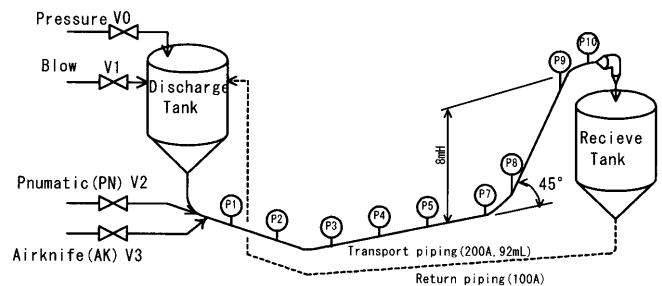


Fig. 1. Outline of the cold transport test.

Table 1. Specification of the cold test.

Item	Specification
Discharge tank	Volume : 17m <sup>3</sup> , Coal weight : 10ton
Transport pipe	SGP200A, distance: 92m, Slope : 45° , Lift : 8.4m
Carrier gas supply	N <sub>2</sub> 0.8MPa x 60m <sup>3</sup> /min

平成16年1月8日受付 平成16年5月8日受理 (Received on Jan. 8, 2004; Accepted on May 8, 2004)

\* 住友金属工業(株) 総合技術研究所 (Corporate Research & Development Lab., Sumitomo Metal Industries Ltd., 16-1 Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki-ken 314-0255)

\* 2 JFEスチール(株) 東日本製鉄所 (East Japan Works, JFE Steel Corp.)

\* 3 (社) 日本鉄鋼連盟開発統括部 (現: 住友金属工業(株) 総合技術研究所) (SCOPE21 R&D Department, The Japan Iron and Steel Federation, now Corporate Research & Development Lab., Sumitomo Metal Industries Ltd.)

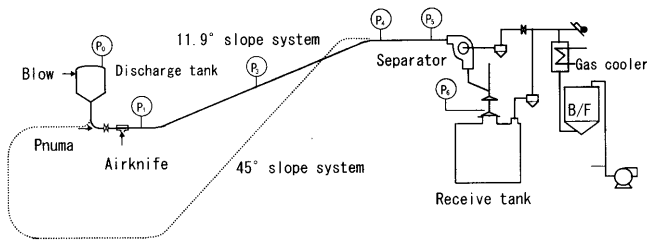


Fig. 2. Outline of the bench scale test.

Table 2. Specification of the bench scale test.

Item	Specification
Discharge tank	Volume : 4.9m <sup>3</sup> Coal weight : 3t
Transport pipe	SGP200A ① 11.9° system : distance 26.1m, Lift 2.230m ② 45° system : distance 45.7m, Lift 7.626m ③ circular system
Separator	Compact inertial separator

3秒間の移動平均処理したデータで解析した。

2.1.2 熱間輸送試験装置 (要素組合せ試験：BP試験)

輸送試験に用いた試験装置の概要を Fig. 2 に、また装置の主仕様を Table 2 に示す。輸送管途中の傾斜部については、ほぼ水平の11.9°、および45°の傾斜管を採用し、傾斜角の輸送に与える影響を調査可能とした。石炭輸送する際の輸送条件である輸送圧力と輸送特性について、輸送圧力を変更してその輸送に与える影響を調査した。データ採取は0.1秒ピッチで実施し、冷間試験と同様に3秒間の移動平均処理したデータで解析した。

2.2 輸送条件

冷間試験では、SCOPE21の輸送条件を想定し石炭としては粒度0.3mm以下を除去した粗粒炭70%と、18ccの成形炭の代替として20~40mmの塊炭を30%配合したものを輸送試験に使用した。

BP試験では、実機を想定し6mm以下の石炭を流動床で分級(成形試験<sup>2)</sup>に合わせて0.3~0.7mmで分級)後、微粉部分は熱間成形し、粗粒炭と混合した石炭を輸送炭とした。なお、成形炭の大きさは18cc(35mm角のマセック型)で、分級後の微粉量は全石炭量の約30%であった。

2.3 試験結果

2.3.1 冷間輸送試験結果

(1) 輸送状況

石炭輸送時の輸送状況の一例を Fig. 3 に示す。試験装置のN<sub>2</sub>供給限界により輸送中の圧力が低下したため輸送速度が変動しているが、輸送速度350t/h・固気比85kg-coal/kg-N<sub>2</sub>の高固気比での輸送が可能との見通しを得た。

(2) 圧力損失の評価

Fig. 3 に示した輸送状況から輸送配管内の圧力損失の整理を行った。石炭輸送速度は輸送タンクの単位時間当たり

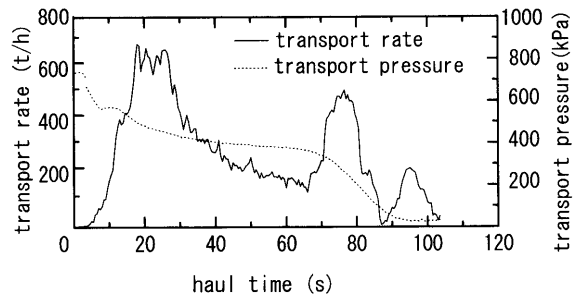


Fig. 3. Variation of transport rate and pressure at high solid-gas ratio.

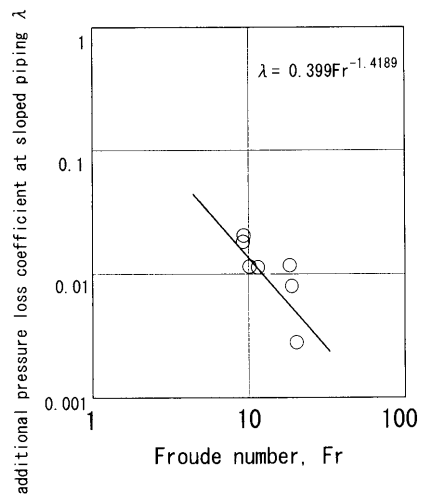


Fig. 4. Relationship between Froude number and pressure loss coefficient at high solid-gas ratio.

重量変化、輸送圧力は輸送タンク圧力とした。輸送開始直後、終了直前は輸送配管全長に渡り石炭が充足していないため輸送抵抗が小さく輸送タンクの払い出し量は大きくなる。輸送の状態の整理はこの輸送開始直後、終了直前の部分を除いた輸送区間の測定値を用いて行った。石炭輸送時の圧力損失はN<sub>2</sub>ガスのみ流入時の配管内の圧力損失と石炭を混入することにより付加される圧力損失<sup>3)</sup>の2者より構成され、(1)から(3)式で表される。

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{gas} + \Delta P_{solid} \dots \dots \dots (1)$$

$$\Delta P_{solid} = \lambda(L/D)(\rho v^2/2)/\mu \dots \dots \dots (2)$$

$$Fr = v/\sqrt{gD} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、λ：圧力損失係数(-)

D：配管径(m)

L：圧力計間距離(m)

P：注目する2点の圧力差(MPa)

ρ：ガス密度(kg/m<sup>3</sup>)

v：空塔速度(m/s)

μ：固気比(-)

g：重力加速度

付加圧損係数λをフルード数Frの関係式で整理した結果、Fig. 4 に示すように良い相関関係が認められた。した

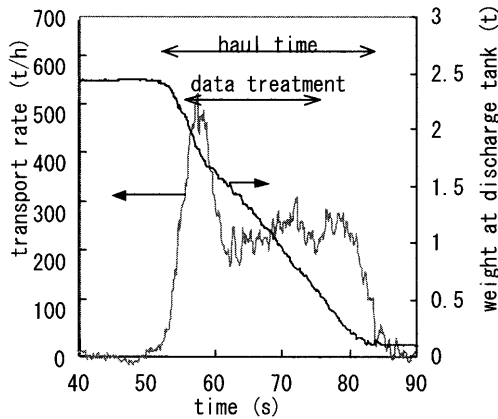


Fig. 5. Variation of transport rate at the bench scale test.

がって、輸送配管各部位の付加圧力損失係数の関係式を把握することにより、輸送必要圧力、輸送媒体である窒素の使用量、固気比等の輸送諸元を予想することが可能である。

2.3.2 BP試験結果

輸送速度、固気比の石炭輸送能力に対する輸送圧力および傾斜配管の角度による影響を求めるため、輸送圧力設定および配管レイアウトを変更して輸送試験を行った。なお、輸送特性の評価指標としては、輸送速度と固気比があり、それぞれ下記の目標設定をした。

- ①輸送速度：240 t/h（コークス炉への装炭時間5 min以内）
- ②固気比：100 kg-coal/kg-N<sub>2</sub>以上（チェーンコンベア動力以下）

(1) 輸送状況

輸送開始から終了までの輸送タンク重量変化から輸送速度を算出した傾斜45°の輸送配管の例をFig. 5に示す。輸送タンク初期圧力375 kPaで輸送開始し、石炭払出シャット弁動作中の非定常部を除いた定常輸送区間での輸送速度は約268 t/hである。以降の解析には定常輸送区間のデータを使用した。石炭温度については、粗粒炭が輸送タンク受け入れ前で270°C、成形炭が同じく260°Cで、輸送後の受けタンクで概ね170°Cであった。搬送用窒素は輸送開始と共に徐々に温度が上がり輸送終了時に100°Cを越える程度となったが、輸送管内の定常状態が得られないため常温として取り扱った。

(2) 輸送圧力の影響

輸送圧力の設定を変更し、前述の平均処理区間での輸送圧力と輸送能力の関係について調査した。傾斜11.9°の輸送配管での輸送圧力と輸送速度、固気比の関係をそれぞれFig. 6, Fig. 7に示す。輸送速度については、輸送圧力の増加とともに輸送速度が上昇するが、成形炭あり・なしの差は小さく、成形炭を含む輸送炭で輸送圧力150 kPaの条件で輸送速度は314 t/hとなる。したがって、SCOPE21の輸送目標である240 t/hでの輸送は十分可能であると考えら

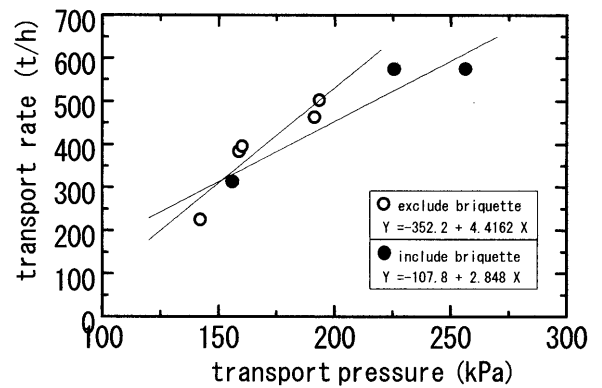


Fig. 6. Relationship between transport pressure and transport rate at the bench scale test.

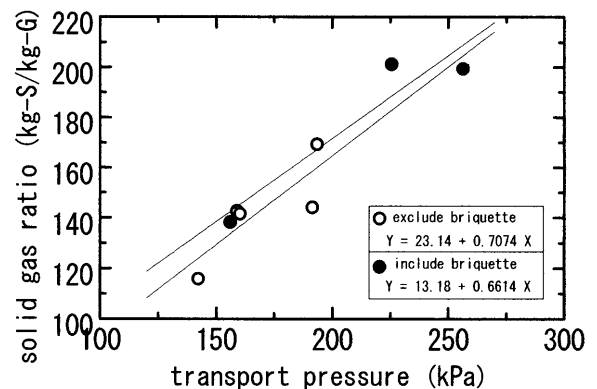


Fig. 7. Relationship between transport pressure and solid-gas ratio at the bench scale test.

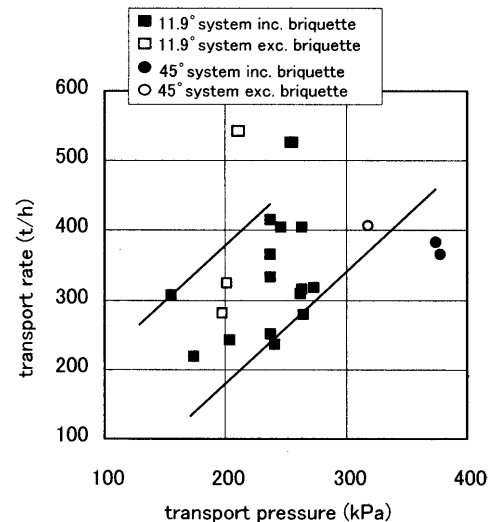


Fig. 8. Relationship between transport pressure and transport rate.

れる。

輸送圧力と固気比の関係は、輸送速度と同様に輸送圧力の増加とともに固気比は上昇する。輸送圧力150 kPaでは固気比120程度、輸送圧力250 kPaで固気比は約200と評価され、当初の目標は十分に達成可能であると判断された。

(3) 傾斜角度の影響

傾斜角度を変更した輸送系の輸送圧力と輸送速度の関係

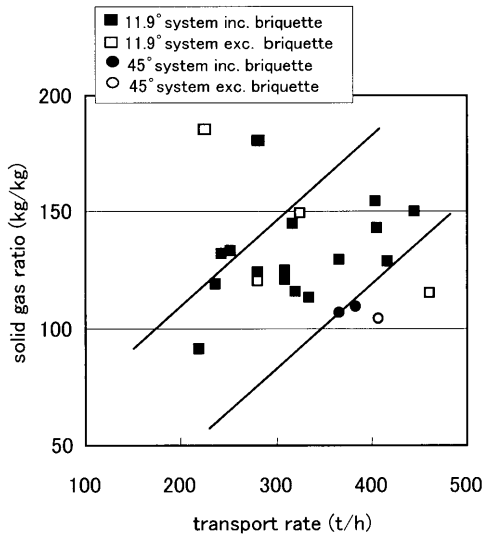


Fig. 9. Relationship between transport rate and solid-gas ratio.

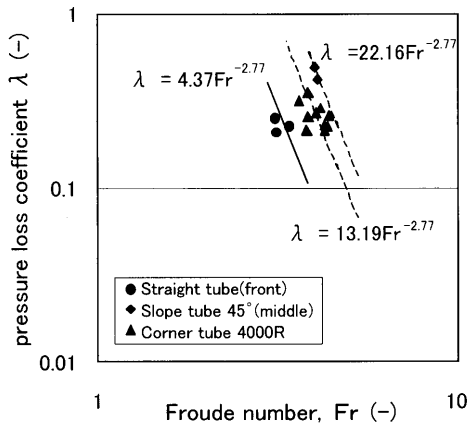


Fig. 10. Relationship between Froude number and pressure loss coefficient.

を Fig. 8 に示す。また輸送速度と固気比の関係を Fig. 9 に示す。傾斜角度 45° の場合は 11.9° に比べ同一の輸送圧力に対して輸送速度が低くなる。また同一輸送速度に対する固気比が低下する。したがって、傾斜角度の増大は輸送圧力の増大につながる。

(4) 輸送管の圧力損失

輸送配管の各部位における圧力損失は、Fig.10 に示すように冷間試験と同様に圧力損失係数λはフルード数Fr関係式で整理される。水平直管部分では最も圧力損失が小さいと評価され、傾斜角45°の傾斜管部分で最も圧力損失が大きい。4000Rの曲管部の圧力損失は、直管と45°傾斜管の中間に位置し圧力損失はやや大きいと評価された。

3. PP 試験

3.1 試験装置

PP試験においては、BP試験において得られた輸送制御特性、配管圧損評価式について再確認を行うと共に、石炭

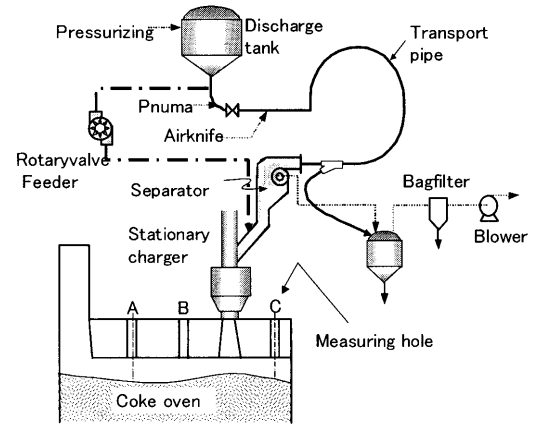


Fig. 11. Outline of the pilot plant test.

Table 3. Specification of the pilot plant test.

Item	Specification
Transport pipe	Diameter: SGP200A Length: 29.6m
Discharge tank	Coal weight: 20ton
Separator/Discharger	Diverted from bench scale plant
Rotaryvalve feeder	500t/h (Max)

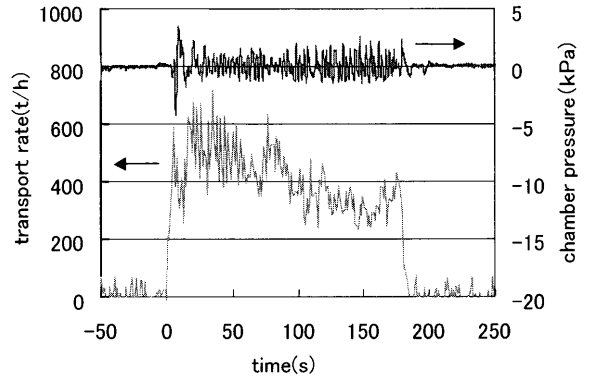


Fig. 12. Transition chart of transport rate and chamber pressure.

装入プロフィールや装入嵩密度等の熱間での石炭装入状況について、調査を行うことを目的とした。Fig.11 に試験設備のフロー、Table 3 に仕様を示す。輸送配管はすべて 200mmφで、4000R 水平曲管を主体とした輸送系とした。コークス炉内の石炭プロフィールは、計測口 A, B, C からのレベル測定と押出機側窓口からの目測により把握する。データ採取方法、データ処理方法はBP試験と同様である。また、プラグ輸送による成形炭粉化の影響を評価するため、ロータリーバルブによる装入試験も実施した。

3.2 結果および考察

3.2.1 輸送状況

Fig.12 にプラグ輸送の装入速度と炭化室圧力の推移の一例を示す。輸送状況は安定しており、装入速度の変動は、操業の観点より特に問題の無いものであった。輸送後半に装入速度が低下する傾向が見られたが、輸送タンク内の石

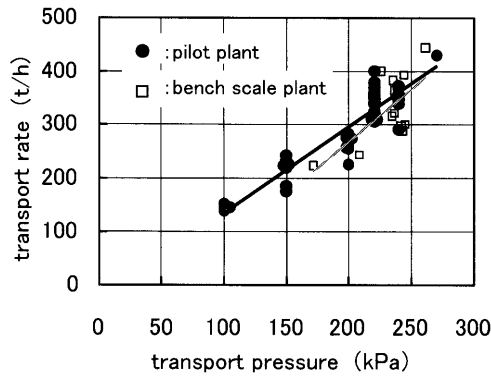


Fig. 13. Relationship between transport pressure and transport rate.

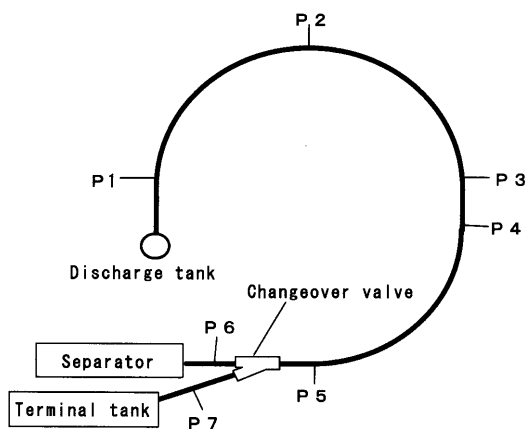


Fig. 14. Transport pipe of the pilot plant.

炭層高の減少に伴い、窒素ガスの漏洩割合が増えることに起因すると思われる。輸送に伴う炭化室内圧力変動は、最初の石炭が炭化室に装入される瞬間に大きくなるが、それ以降は±2kPa程度で安定している。初期の圧力変動については、ロータリーバルブによる装入の場合においても発生することから、プラグ輸送特有の現象ではなく、PP固有の原因と考える。PPは単一炉であり、実炉のドライメインに相当するバッファー部分が無いため、炭化室内の圧力変動が大きくなり易いことが原因と推定される。

3・2・2 輸送速度制御

輸送圧力（輸送タンク圧力）により輸送速度を制御可能であることを、PP試験においても確認した。Fig.13に輸送圧力と輸送速度の関係を示す。図中にBP試験のデータも併記したが、ほぼ同じ傾きである。

3・2・3 輸送管の圧力損失

PP試験での輸送配管の圧力損失について輸送配管の詳細を Fig.14 に示し、輸送管各部位の圧力損失係数λとのFr関係を整理したものを Fig.15 に示す。4000R曲管の圧力損失係数λは、BP試験の結果と同様な結果が得られた。なお、直管部についてはその距離が極めて短く、前後に続く曲管の影響を受けているため直管部としての評価は行わなかった。

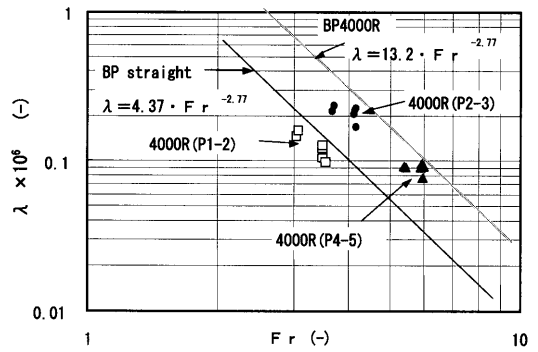


Fig. 15. Relationship between Froude number and pressure loss coefficient.

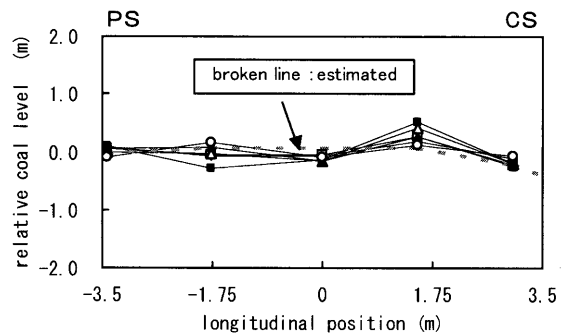


Fig. 16. Profile of the charged coal.

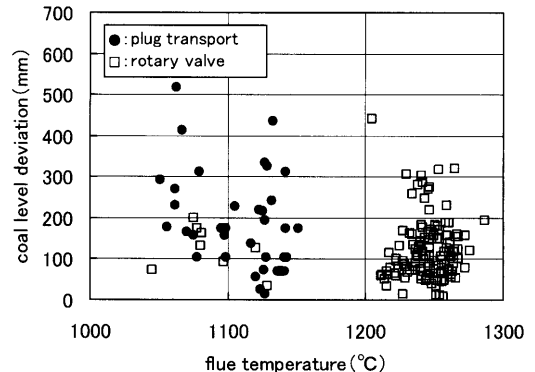


Fig. 17. Relationship between flue temperature and deviation of coal level.

3・2・4 装入評価

Fig.16 にプラグ輸送時の装入プロフィールの例を示す。若干のバラツキは見られるものの当初想定したプロフィールに近い状態で装入されている。Fig.17 にコークス炉温と装入レベル差の関係を示す。ここで、装入レベル差は、装入完了時における石炭レベルの5測定点の平均値とその中の最高値との差を示すもので、プラグ輸送時の装入レベルの標準偏差σは116mm、ロータリーバルブを介した装入の場合で72mmとなりプラグ輸送時の方が装入レベルのバラツキが大きかった。しかし、プラグ輸送時において3σ=348mmであり、ガス道高さの設計値350mmを下回っている。SCOPE炉がダブルドライメン前提であることも考え合わせると、ノーレベラー装入で十分問題無いと判断

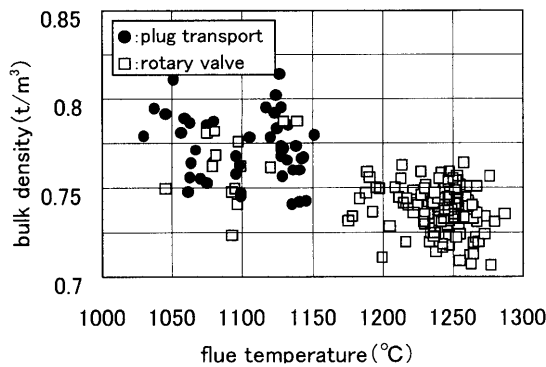


Fig. 18. Relationship between flue temperature and bulk density of the charged coal.

した。Fig.18に、装入嵩密度とコークス炉温の関係を示す。装入嵩密度は、コークス炉温が高くなるほど、小さくなる傾向が見られる。また、当初想定していた0.85 t/m<sup>3</sup>に比べて、低い値を示しており、0.71~0.80 t/m<sup>3</sup>となった。冷間であるBP試験においては、0.84 t/m<sup>3</sup>前後の嵩密度が得られていたことから、嵩密度低下の主要因は熱間であること、すなわちコークス炉内におけるガス発生の影響であると考えられる。BP試験の調査においては、プラグ輸送による成形炭の粉化率が30%程度であった。そのため、成形炭の粉化による嵩密度への影響が懸念されていたが、ロータリーバルブ装入との比較では差異は認められなかった。また、成形炭粉化のもう一つの影響として、炭化室のカーボン付着が想定されたが、目視確認では既存炉よりカーボン付着が少なく、問題は無いと判断した。PP試験においては、サンプリングが困難であるため、成形炭粉化率を調査することはできなかったが、以上の点から、プラグ輸送に伴う成形炭の粉化については、操業上の問題は無い判断される。最終的に装入炭嵩密度は以下に示す式で整理可能である。

$$\begin{aligned} \text{装入炭嵩密度} = & 0.767 + a[\text{炉温}(\text{°C}) - 1150] \\ & + b[\text{装入速度}(\text{t/h}) - 400] \\ & + c[\text{装入炭温度}(\text{°C}) - 200] \quad (\text{t/m}^3) \\ a = & -1.91 \times 10^{-4}, \quad b = 1.79 \times 10^{-5}, \quad c = -2.14 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

実機条件として炉温1250°C、装入炭温度330°Cと設定すると、装入嵩密度は0.72 t/m<sup>3</sup>となる。

#### 4. 結言

高温炭の無発塵輸送・装入の手段としてプラグ輸送の基礎研究、BP試験、PP試験を行い下記の成果を得た。

(1) 冷間試験において、コークス炉へ装入するのに十分な輸送速度および固気比で石炭を輸送できることを確認した。

(2) また、輸送時の圧力損失係数は、フルード数の関数として整理可能であることが判明した。これにより、輸送に必要な圧力、ガス流速等の設計条件を推定することが可能となった。

(3) 要素組合せ試験において、成形炭を含む高温炭を所定の能力（輸送速度：240 t/h以上、固気比：100 kg/kg-N<sub>2</sub>以上）で輸送可能なことを確認した。

(4) また、輸送設計に必要なエンジニアリングデータ、圧損評価式を得ることができた。

(5) PP試験において、要素組合せ試験で得られたエンジニアリングデータ、圧損評価式の妥当性を確認した。

(6) また、高温炭の熱間コークス炉への装入は特に問題無いことを確認し、実機の装入嵩密度は、0.72 t/m<sup>3</sup>と想定した。

最後に、本研究は石炭生産・利用技術振興費補助金の石炭燃焼技術開発（石炭高度転換コークス製造技術）に係る研究の一環として実施されたものであり、ここに関係各位に感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) K.Nishioka: Proc. 3rd Int. Cokemaking Cong., CRM, Liege, (1996), 285.
- 2) H.Taketomi, K.Nishioka, Y.Nakashima, S.Suyama and M.Matsuura: 4th Int. Cokemaking Cong. Proc., ATS, Paris, (2000), 278.
- 3) 改訂五版化学工学便覧、化学工学協会編、丸善、東京、(1998), 268.